

팔당호와 충주호 퇴적물의 탄소성 산소요구량 비교

신유나^{1,*} · 박혜경 · 이상원 · 공동수

(¹원주지방환경청, 국립환경과학원 한강물환경연구소)

Comparison of Carbonaceous Sediment Oxygen Demand in Lake Paldang and Lake Chungju.
Shin, Yuna^{1,}, Hae-Kyung Park, Sang-Won Lee and Dong-Soo Kong (¹Wonju Regional Environmental Office, 242-2 Myeongnyun-dong, Wonju-si, Gangwon-do; Han River Environment Research Laboratory, 627 Yangsu-ri, Yangseo-myon, Yangpyung-gun, Gyeonggi-do, Korea)*

The purpose of this study was to investigate the seasonal variations of sediment oxygen demand (SOD) in Lake Paldang and Lake Chungju of the Han River system and to suggest SOD values as parameters for the water quality prediction models of two lakes. SOD was measured at laboratory using sediment collected at 2 sites in Lake Paldang from June to November and at 4 sites in Lake Chungju from May to November in 2005, respectively. It was found from the laboratory test that the SOD in Lake Paldang ranged from 337.8 to 881.0 mg O₂ m⁻² d⁻¹ and in Lake Chungju ranged from 143.0 to 969.1 mg O₂ m⁻² d⁻¹. The SOD of Lake Paldang showed similar variations to the content of organic matter of sediment. The SOD of Lake Chungju was positively correlated with temperature ($r=0.78, p<0.01$), PO₄-P ($r=0.79, p<0.01$), TP ($r=0.55, p<0.05$), DTP ($r=0.55, p<0.05$), NO₃-N ($r=0.72, p<0.01$) of hypolimnetic water. These results indicate that the SOD of Lake Paldang was affected by the content and origin of organic matter of sediment and the SOD of Lake Chungju was closely correlated with physical and chemical factors.

Key words : Sediment Oxygen Demand (SOD), Lake Paldang, Lake Chungju

서 론

수질을 오염시키는 많은 물질은 입자상태의 물질에 흡착되어 수체의 바닥에 퇴적되었다가 수층의 환경변화나 퇴적물 내의 물리·화학적 변화에 따라 다시 수층으로 이동하기 때문에 오염물질의 유입을 저감하여도 수질 개선 효과가 쉽게 나타나지 않는다(전, 1990). 뿐만 아니라 점오염원과 비점오염원을 통해 유입되는 외부 오염물질과 내부 생성 유기물(조류나 식물의 사체)은 유속이 완만한 하천이나 호소의 저층에 퇴적되며, 저층에 토착 생활하는 저서성 대형무척추동물의 호흡과 박테리아에 의

한 분해, 철이나 망간 황화물과 같은 기질의 산화환원 반응, 지화학적 반응을 통해 수층의 산소가 소비된다(전, 1990).

퇴적물 내에서 산소의 농도는 생물학적 호흡, 화학적 반응, 그리고 빛이 도달하는 지역에서의 저층 광합성 등에 의해 변화하는데(Epping and Helder, 1997), 수체와 퇴적물의 경계면 부근에서 많은 생물화학적 반응들이 발생하여 수체로부터 퇴적된 유기물이 미생물이나 저서생물 혹은 화학적 기작에 의해 분해되는 에너지 대사과정이 일어나며 이 과정에서 산소가 소모된다.

SOD는 퇴적물에서 유기물 분해에 따른 산소 소모량으로 수질을 결정짓는 중요한 지표로 이용되는데(Otubu,

* Corresponding author: Tel: 033) 760-6473, Fax: 033) 760-6499, E-mail: ynshin@me.go.kr

1989), 여러 수환경에서 SOD가 전체 수층의 산소소모의 대부분을 차지 (Belanger, 1981; Takada and Kato, 1991; Gelda *et al.*, 1995)하고 있으므로, 담수 수계에서 퇴적층 (sediment)은 호내 영양염의 농도나 생산성을 변화시키고 수체의 영양단계에 영향을 미치는 등 중요한 역할 (Bostrom *et al.*, 1982)을 담당할 수 있다. 이런 배경에서 호수에서는 VHDR (Volumetric Hypolimnetic Depletion Rate)을 통하여 퇴적물의 산소요구 (Sediment Oxygen Demand: SOD)가 수층 산소농도 변화를 어느 정도 유발하는지를 통해 영양단계를 평가하는 방식이 적용되고 있다 (Burns, 1995). 또한 생활하수가 유입되는 하천의 경우 입자성 유기물이 하천바닥에 침전되어 다량의 퇴적물 산소요구량을 가지게 되며 이는 수중 용존산소 변화에 매우 큰 영향을 미친다. 그런데 퇴적물에 의한 산소소모는 대부분의 수질인자 변화처럼 수체 내에서 균일하게 일어나는 체적과정 (volumetric process) 현상이 아니고 바닥과 수면사이에서 일어나는 면적과정 (areal process) 현상이므로, 그 변화량을 측정하는 것은 매우 어렵고 (Eaton *et al.*, 2005) 따라서 아직까지 수층에서의 산소요구에 비해 SOD에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다.

우리나라의 호수는 대부분 하천에 댐을 건설하면서 조성된 인공호수로 체류시간이 자연호수에 비해 짧고 또한 상류하천에서의 유입유량, 홍수나 갈수시의 수문조작 등에 의해 체류시간이 불규칙한 수리수문학적 특성을 갖고 있으며 오염물질 기원별 기여도가 수리학적 현상에 크게 영향을 받는다 (박 등, 2004). 특히 체류시간이 짧은 하천형 호수에서는 내부생산에 비해 외부기원 오염물질의 비중이 훨씬 크며, 체류시간이 긴 호수형 호수에서도 자연호에 비해 상대적으로 외부기원 오염물질의 비중이 큰 것으로 알려져 있다 (한강물환경연구소, 2005, 2006). 따라서 우리나라 인공호의 퇴적물은 장시간 내부 생산 유기

물이 주로 축적된 자연 호수의 퇴적물과는 다른 성상을 보일 것으로 판단되며 이런 퇴적물에 의한 산소요구량 역시 차이를 보일 것으로 판단된다.

우리나라의 인공호는 대부분이 주요 상수원으로 사용되고 있어 그 수질관리를 위해 많은 대책들이 수립되고 있으며 그 과정에서 호수 내에서 일어나는 물질순환, 에너지 흐름 등을 고려한 수질예측모델 기법이 이용된다. 그러나 이런 수질예측모델링에 사용되는 많은 계수들이 대상호수에서 실측된 자료가 없어 외국에서 조사된 자료를 대입하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 대표적 인공 댐호 중에서 수리학적 유형이 다른 팔당호와 충주호에서 시기별로 퇴적물의 산소요구량 (SOD)을 조사하여 두 호수의 수질예측 등을 위한 모델에 사용할 계수를 제시하고, 서로 수리학적 유형이 다른 두 호수에서 퇴적물의 오염 정도를 측정하고 SOD에 영향을 주는 인자를 유추하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 조사 기간

본 연구는 인공호의 수리학적 유형으로 볼 때 하천형으로 구분되는 팔당호와 호수형으로 구분되는 충주호를 대상으로 조사하였다. 두 호수의 일반 제원 및 조사지점의 좌표를 Table 1에 나타내었다. 팔당호는 대표적인 하천형 호수로 체류시간이 2.6~9일로 짧고 수심이 얕아 현저한 성층을 형성하지 않으며 호내 수질 및 생태계가 상류 하천에서의 유입유량의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다 (공 등, 1996). 충주호는 여름철에 중하류 수역에서 성층이 형성되는 일순환 호수로 수심이 깊고 체류시간이 길어 호수 수질이나 수중생태계가 상류하천의 유입유량의 증감에 직접적인 영향을 받지 않으며 강우기

Table 1. Hydrological characteristics and sampling sites of the Lake Paldang and Lake Chungju (Data from Water Management Information System, www.wamis.go.kr).

Characteristics	Lake Paldang	Lake Chungju
Average annual volume (m ³)	250 × 10 ⁶	1,535 × 10 ⁶
Surface area (km ²)	38.2	63.5
Drainage area (km ²)	23,800	6,648
Average HRT (days)	5	102
Mean depth (m)	6.5	28.4
Water surface elevation (m)	25.2	129.2
Sampling sites	St. 1 (Padang dam) St. 2 (Kwangdonggyo (Br))	St. 1 (Chungju dam) St. 2 (Dongnyang-myeon) St. 3 (Cheongpung-myeon) St. 4 (Oksoongyo (Br))

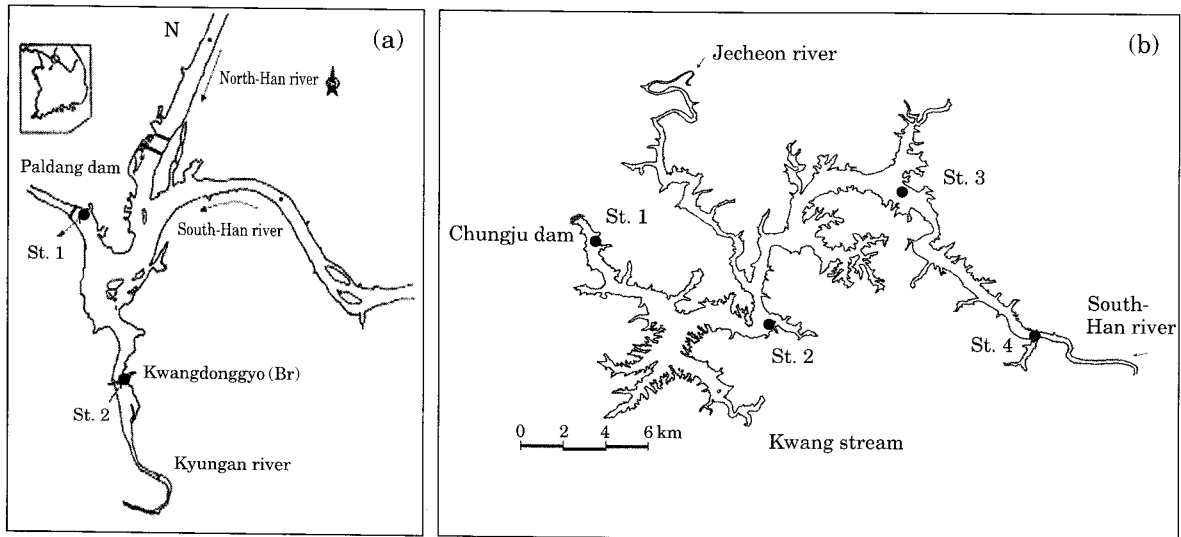


Fig. 1. Sites map of (a) 2 sites of PD-St. 1 (Paldang dam) and PD-St. 2 (Kwangdonggyo (Br)) in Lake Paldang and (b) 4 sites of CJ-St. 1 (Chungju dam), CJ-St. 2 (Dongnyang-myeon), CJ-St. 3 (Cheongpung-myeon) and CJ-St. 4 (Oksoongyo (Br)) in Lake Chungju.

에 오히려 하류의 홍수방지를 위해 수문을 닫으므로 수위가 증가하게 되고, 또한 많은 저수용량으로 오염물질 부하에 대한 완충력이 큰 호수형 호수이다(한강물환경연구소, 2005).

팔당호는 호수 대표지점인 댐 앞 지점(PD-St. 1)과 팔당호 내에서 가장 오염이 심한 경안천 수역의 광동교 지점(PD-St. 2)의 2지점에서 2005년 6, 9 및 11월에 조사하였으며, 충주호는 호수 대표지점인 댐 앞 지점(CJ-St. 1)을 포함하여 호수의 상류부터 하류까지 4 지점을 선정하여 2005년 5, 7, 9 및 11월에 조사하였다(Fig. 1). 매 조사 시기마다 각 조사지점에서 반돈채수기로 심층수를 채수하고 Grab sampler로 퇴적물을 채취하였으며, 다항복원장측정기(YSI 6600, YSI Inc.)를 사용하여 수온, pH, 전기전도도 및 DO 등의 현장 항목을 측정하였다. 수심이 얕은 팔당호는 바닥에서 1~2m 내에서 채수하였고, 수심이 깊은 충주호는 최대한 바닥에서 가까이 채수하여 적어도 3~4m 이내에서 채수하였다. 채수시 퇴적물의 교란에 의한 영향을 줄이기 위해 심층수의 채수가 끝난 후 Grab sampler로 퇴적물을 채취하였다.

2. SOD 측정 방법

본 연구의 조사대상 지점은 모두 수심 5m 이상으로 SOD의 현장 측정이 불가능하였으므로 실험실 방법을 이용하여 SOD를 측정하였으나, 현재까지의 SOD 조사방

법은 현장 상태를 반영하는 데는 여러 한계를 가지고 있다. 측정시 발생될 수 있는 퇴적물의 교란 등으로 인한 결과의 오차를 최대한 줄이기 위해 Grab sampler를 이용하여 채취한 퇴적물이 혼합되지 않도록 퇴적물 주위에 틀을 만들어 아크릴 재질의 원통형 실험조(높이 30 cm, 지름 8 cm)를 퇴적물 내에 직접 삽입하여 층이 손상되지 않은 약 5 cm의 퇴적물을 현장에서 즉시 실험조에 담아 뚜껑을 아래에서 닫았다. 이 퇴적물을 공기와 접촉이 없도록 밀폐하고 암상태를 유지하여 실험실로 운반하였으며, 4°C에 보관한 후 2주 이내에 사용하였다(강과 송, 2000). 퇴적물의 탄소성 산소요구량을 측정하기 위해 각 지점의 현장 심층수에 질화작용 저해제인 2-chloro-6-(trichloro-methyl) pyridine을 methanol에 용해시켜 최종 농도가 0.01 g L⁻¹이 되도록 첨가하여 사용하였다(강과 송, 2000). 퇴적물이 든 실험조에 퇴적물이 현탁되지 않고 또한 기포가 생기지 않도록 튜브를 이용하여 심층수를 가득 채운 후 교반장치(mixing propeller: 20 rpm), DO meter (Hanna HI91410), 기록계가 연결된 cap을 덮어 20°C에서 배양하였으며(Fig. 2), 각 지점별로 2개씩 배양하여 퇴적물이 안정된 이후부터 DO의 변화가 나타나지 않을 때까지 15분 간격으로 DO를 계속 측정하였다. 20°C에서 측정된 SOD는 시간경과에 따른 용존산소 소모량에, 여기에 주입한 현장수의 부피(L)를 곱하고 실험조의 단면적(m³)을 나누어 다음 식과 같이 산출하였다(국립환경연구원, 2003). 시간경과에 따른 용존산소 소

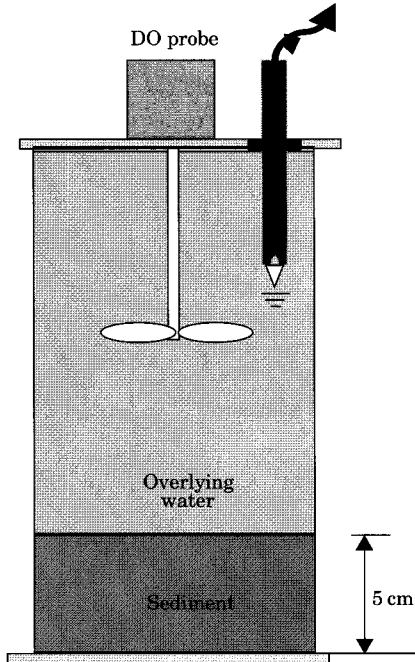


Fig. 2. Equipment of SOD measurement including DO probe and cap with propeller.

모양은 반응시간, 수중 산소결핍 등의 영향을 배제하기 위하여 DO가 직선으로 감소하는 구간을 선택하여 소모된 산소량을 일(day)로 나누어 단위 일당 산소 소모량으로 계산하였다.

$$\text{SOD} (\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = \text{Oc} * \text{V} / \text{A} / \text{T}$$

O_c: O₂ consumption (mg L⁻¹)

V: water volume (L)

A: water-sediment interface area (m²)

T: time (day)

20°C에서 측정된 SOD를 다음 식을 이용하여 현장 심층수 온도에서의 SOD 값으로 환산하였다(Truax *et al.*, 1995).

$$\text{SOD}_{(t_1)} = \text{SOD}_{(t_2)} * 1.065^{(t_1 - t_2)}$$

t₁: 현장 심층수 온도

t₂: 20°C

SOD 측정 시 총 소비되는 DO는 저질에 의한 산소 소비 외에 수층 자체의 산소 소비값을 포함하므로, 순수한 SOD를 측정하기 위해 수층에 의한 DO소비를 다음과 같이 보정하였다

① chamber 내에서 소모된 총산소량(mg L⁻¹)=DO 변

화량(mg L⁻¹)×하층수 부피(L)

② 수중유기물에 의해 소모된 산소량(mg L⁻¹)=BOD₅ (mg L⁻¹)/5×하층수 부피(L)×시간(day)

③ 저질에 의해 소모된 산소량(mg L⁻¹)=①-②

SOD 실험조 내 DO는 YSI 5100을 이용한 격막 전극법으로 측정하였으며, BOD₅, 클로로필 *a*와 영양염류의 분석은 수질오염공정시험방법(환경부, 2002)을 따랐다. 퇴적물의 TC와 TN은 CHN analyzer (Vario EL)를 이용하여 분석하였고, 유기물 함량은 해양환경공정시험법(국립수산진흥원, 1997)에 의해 건조시료를 550°C 전기로(Advantec KM-280 Electric Muffle Furnaces)에서 항량연소 후 무게감량으로 계산하였다. 퇴적물의 함수량은 퇴적물 원 시료를 2 mm 체에 거른 뒤 평량하고, 이를 105°C에서 건조하여 무게감량으로 계산하였다. 또한 입도분석은 퇴적물을 채취한 후 2mm의 체에 거른 습시료를 이용하여 입도 분석기(Mastersizer-2000, Malvern Instruments Ltd.)로 분석하였다. SPSS 10.0 version을 이용하여 층주호의 SOD와 환경인자간 상관관계를 분석하였다. 팔당호는 조사 지점과 횡수가 적어 회귀분석을 통한 상관관계를 조사하지 못하였다.

결과 및 고찰

1. 팔당호와 층주호의 SOD

팔당호와 층주호의 SOD를 측정한 결과, 팔당호의 SOD는 조사기간 전체 평균 610.0 mg O₂ m⁻² d⁻¹, 층주호에서는 조사기간 전체 평균 529.4 mg O₂ m⁻² d⁻¹를 나타냈다(Table 2, 3). 팔당호와 층주호의 SOD는 모두 조사지점과 조사 시기에 따라 차이를 보였다.

팔당호 PD-St. 1의 SOD는 337.8~750.8 mg O₂ m⁻² d⁻¹, PD-St. 2에서는 431.8~881.0 mg O₂ m⁻² d⁻¹를 나타냈고, 조사가 이루어진 6, 9, 11월 모두 PD-St. 1보다는 PD-St. 2에서 SOD가 높게 나타나 수중 유기물 및 영양염류의 오염도가 높은 경안천 수역에서(박 등, 2005) 퇴적물의 산소요구량도 높은 것으로 조사되었다. 월별로는 PD-St. 1의 경우 9월에 가장 높았고, 11월에 가장 낮았으나 뚜렷한 차이는 나타내지 않았다. PD-St. 2의 SOD도 9월에 881.0 mg O₂ m⁻² d⁻¹로 높은 값을 보였고, 6월에 783.6 mg m⁻² d⁻¹, 11월에는 약 431.8 mg O₂ m⁻² d⁻¹로 낮았다(Table 2).

1999년 6, 9 및 11월에 강과 송(2000)이 팔당호의 남한강 수역(두물머리지점) 수변부에서 조사한 *in situ* SOD

Table 2. Sediment Oxygen Demand (SOD), hypolimnetic water qualities and characteristics of sediment in Lake Paldang (PD).

	SOD (mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)	Hypolimnetic water				Sediment	
		Temperature (°C)	DO (mg L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Chl- <i>a</i> (mg m ⁻³)	Organic matter (%)	Clay-silt (%)
<i>June 29, 2005</i>							
PD-St. 1	474.7	20.5	8.2	1.7	13.7	7.4	—
PD-St. 2	783.6	20.6	6.2	2.6	14.0	8.1	—
<i>September 7, 2005</i>							
PD-St. 1	750.8	22.1	9.0	1.3	32.5	9.7	84.4
PD-St. 2	881.0	23.1	9.9	3.1	109.7	10.7	78.7
<i>November 16, 2005</i>							
PD-St. 1	337.8	11.7	8.2	1.4	29.0	8.4	83.3
PD-St. 2	431.8	8.2	11.5	2.4	10.0	9.2	82.8

Table 3. Sediment Oxygen Demand (SOD), hypolimnetic water qualities and characteristics of sediment in Lake Chungju (CJ).

	SOD (mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)	Hypolimnetic water				Sediment	
		Temperature (°C)	DO (mg L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Chl- <i>a</i> (mg m ⁻³)	Organic matter (%)	Clay-silt (%)
<i>May 23, 2005</i>							
CJ-St.1	244.0	5.8	9.8	1.6	3.4	9.8	—
CJ-St. 2	402.4	6.6	9.5	1.1	1.3	8.0	—
CJ-St. 3	232.0	7.7	7.7	2.5	1.0	7.9	—
CJ-St. 4	143.0	16.0	6.7	1.8	6.2	6.2	—
<i>July 21, 2005</i>							
CJ-St. 1	311.4	7.5	3.2	0.9	0.8	7.3	96.0
CJ-St. 2	962.7	17.2	8.9	0.8	1.6	6.7	100.0
CJ-St. 3	779.0	17.6	8.9	0.4	3.9	6.2	97.0
CJ-St. 4	716.5	19.7	8.3	1.2	10.6	5.4	78.0
<i>September 21, 2005</i>							
CJ-St. 1	359.1	10.5	0.3	1.0	0.6	7.7	56.9
CJ-St. 2	969.1	19.7	7.3	1.4	1.5	6.8	98.8
CJ-St. 3	661.5	18.9	9.5	1.0	1.5	6.4	98.7
CJ-St. 4	828.6	18.4	9.8	2.0	1.3	7.0	79.2
<i>November 29, 2005</i>							
CJ-St. 1	516.0	12.8	9.2	0.9	2.9	9.8	99.0
CJ-St. 2	508.5	13.8	9.9	1.1	2.0	11.3	99.5
CJ-St. 3	433.5	10.9	10.6	0.6	0.4	10.9	98.4
CJ-St. 4	402.9	8.9	11.3	1.6	0.5	10.6	89.8

결과는 127.2~302.4 mg O₂ m⁻² d⁻¹ 범위로, 본 연구의 팔당호 조사에서 현장온도로 환산하여 얻은 SOD 값인 337.8~881.0 mg O₂ m⁻² d⁻¹ 범위보다 낮았다(Table 4). 이런 차이는 두 조사에서 사용한 실험방법의 차이(현장 측정법과 실험실 측정법)와 조사지점의 수층 및 퇴적물 차이에서 기인하는 것으로 생각된다. 본 조사는 수심 약 20 m인 댐 앞과 5 m 정도인 경안천 수역의 호수 중심부의 퇴적물을 대상으로 조사되어 실험실에서 조사되었고,

강과 송(2000)의 연구는 수심 1 m 미만의 두물머리 가장 자리에서 이루어졌다. 일반적으로 수심이 낮은 하천의 경우 SOD측정은 주로 현장에서 행해지며, 하천바닥에 chamber의 설치가 불가능할 경우 sediment를 실험실로 운반하여 SOD를 측정해야 한다. 두 방법 모두 정확한 측정을 하는 데는 다소 어려움이 있지만, 특히 실험실에서 SOD를 측정해야 할 경우 실제의 자연환경과 동일한 조건을 주기 어렵다는 단점이 있다(Blosser, 1986).

또한 강과 송(2000)이 조사한 팔당호 두물머리지점의 수중 BOD₅ 값은 1.8~2.3 mg L⁻¹, 퇴적물의 유기물 함량은 3.7~4.5%, 총유기탄소(TOC)는 1.16~2.59 mg g⁻¹ sediment 범위였으나, 본 조사의 6, 9 및 11월의 PD-St. 1 과 PD-St. 2에서의 BOD₅ 값은 1.3~3.1 mg L⁻¹, 유기물 함량은 7.4~10.7%, 퇴적물의 총탄소량(TC) 값은 25.8~35.5 mg g⁻¹ sediment 범위로 강과 송(2000)이 조사한 두물머리지점보다 훨씬 더 높게 나타났다. 본 연구의 대상 지점인 팔당댐 앞과 경안천 수역의 호수중심부는 수심이 깊어 입자상 유기물의 퇴적이 강과 송(2000)이 조사한 호안에 비해 더 많이 일어났을 것으로 추정되며, 특히 경안천 수역의 경우 식물플랑크톤의 대량발생이 빈번히 일어나는 등 입자상 유기물발생량이 높아(박 등, 2005) 퇴적물의 유기물 함량이 기존 조사지점에 비해 더 높은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 조사 대상 지점에서 퇴적물 및 수중의 유기물지표가 더 높아 기존 연구의 조사 지점보다 SOD도 높게 나타난 것으로 판단되며, 이런 결과로 볼 때 수중 BOD₅ 값, 퇴적물의 유기물함량 등이 팔당호의 SOD에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

충주호 4지점의 SOD 값의 범위는 143.0~969.1 mg O₂ m⁻² d⁻¹로 팔당호보다 넓은 범위를 보였는데, 시기별로는 5월에 가장 낮았고 7월과 9월 조사에서 높았으며 지점별

로는 11월을 제외하고 CJ-St. 1에서 가장 낮았고, 7월 CJ-St. 2에서 가장 높은 값인 969.1 mg O₂ m⁻² d⁻¹를 나타냈다. 5월의 SOD 값은 4지점 모두 다른 달에 비해 매우 낮았으며, 7월과 9월에 SOD가 높아졌는데, 이런 시기별 SOD의 차이는 각 시기의 수온변화와 유사한 변동을 보여 5월에 수온이 가장 낮았으며 7월과 9월에 수온이 높았고 수온이 다시 감소한 11월에 SOD도 감소하는 경향을 보였다. 또한 전 지점 중에서 가장 낮은 SOD를 보인 CJ-St. 1에서는 수심이 깊어 전 조사 기간 동안 심층수의 수온이 낮아 다른 지점에 비해 SOD가 낮았으며 조사시기별 차이도 크지 않은 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 장우기인 7월과 9월에는 유역에서 유입되는 외부유래 유기물량이 절대적으로 많은 비율을 차지하여 다른 달에 비해 SOD 값이 높게 나타난 것으로 판단된다.

현재까지 세계 각지의 여러 호수와 하천의 *in situ* SOD는 수백~수천 mg O₂ m⁻² d⁻¹ 범위를 나타내는 것으로 보고되었다(Sommaruga, 1991; Truax *et al.*, 1995). 정과 조(2003)는 담수 퇴적물에서의 SOD 값이 1,500 mg O₂ m⁻² d⁻¹ 이상인 곳을 오염된 곳으로 정하였는데, 팔당호와 충주호의 SOD 값은 모두 1,500 mg O₂ m⁻² d⁻¹ 이하로 퇴적물의 유기물 오염정도는 심하지 않은 것으로 나타났으며(Table 5) 특히 수체의 부영양화가 심각한 수준인 팔당호의 경안천 수역의 퇴적물도 수체와 비교할 때 오염이 심하지 않은 것으로 나타났는데, 이런 현상은 팔당호의 체류시간이 짧고 특히 여름철 집중강우기에는 하루에도 수 회 이상 수체가 교체되며 이 과정 중에 퇴적물의 유실도 일어나기 때문에 자연호수에 비해 유기성 퇴적물의 축적이 많지 않기 때문으로 판단된다(공 등, 1996).

Table 4. Comparison of Sediment Oxygen Demand (SOD) surveyed in Lake Paldang (PD).

SOD (mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)	This study	Gang and Song (2000)
	337.8~881.0	127.2~302.4
Period	Jun., Sep., Nov. in 2005	Jun., Sep., Nov. in 1999
TOC or TC (mg m ⁻² d ⁻¹)	25.8~35.5 (TC)	1.16~2.59 (TOC)
Organic matter (%)	7.4~10.7	3.7~4.5
BOD ₅ (mg L ⁻¹)	1.3~3.1	1.8~2.3

2. 호수별 영향인자

충주호의 지점별, 시기별 SOD에 영향을 미치는 환경인자를 파악하기 위하여 SOD와 수질 및 퇴적물 관련 항

Table 5. Comparison of Sediment Oxygen Demand (SOD) between different region in the freshwater sediment.

Site	Experiment condition	SOD (mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)	References
Lake Paldang	Laboratory	337.8~881.0	This study
Lake Chungju	Laboratory	143.0~969.1	This study
Lake Onondaga	Laboratory	820~2240	Gelda <i>et al.</i> (1995)
Lake Ton-Ton	Laboratory	1240 (mean)	Sommaruga (1991)
Lake Gachang	Laboratory (batch)	30~459	Yee <i>et al.</i> (1995)
Lake Nuldernew	Laboratory (batch)	900~3600	Van Luijin <i>et al.</i> (1999)
Nagdong River	Laboratory (batch)	1220~3400	Jung and Cho (2003)
Catfish Pond	<i>In situ</i>	1910~6820	Berthelson <i>et al.</i> (1996)
Lake Paldang	<i>In situ</i> (batch)	40~300	Gang and Song (2000)
Seognam Stream	<i>In situ</i> (batch)	2480~5330	Go and Jung (1993)

Table 6. Pearson coefficient of regression analysis between hypolimnetic water qualities and characteristics of sediment with SOD in Lake Chungju (CJ) from May to November, 2005.

	Lake Chungju									
	(In 5, 7, 9, 11)			(In 7, 9, 11)		(In 7, 9)			In all sites	
	All sites	St. 1	St. 2, 3, 4	St. 1	All sites	May	Jul.	Sep.	Nov.	
<i>Sediment</i>										
Organic matter	-0.61*	0.24	-0.40	1.00*	-0.52	0.39	-0.55	-0.63	-0.19	
TC	0.18	0.16	-0.02	0.29	0.28	-0.69	0.38	0.21	-0.98*	
Clay	-	-	-	0.39	-0.38	-	-0.68	-0.60	0.88	
Interspatial NO ₃ -N	-	-	-	0.37	0.41	-	-0.33	0.99*	-0.26	
Water content	-0.10	0.14	0.29	0.76	-0.44	0.59	-0.41	-0.50	0.96*	
Solid	0.10	-0.14	-0.29	-0.76	0.44	-0.59	0.41	0.50	-0.96*	
<i>Hypolimnetic water</i>										
Temperature	0.78**	0.96*	0.72**	0.93	0.88**	-0.70	0.90	0.91	0.96*	
DO	0.23	0.12	0.01	0.85	0.81*	0.74	0.96*	0.76	-0.96*	
TOC	0.28	0.26	0.15	0.52	0.76*	-0.85	0.81	0.88	0.20	
POC	0.34	0.36	0.24	0.59	0.66	-0.82	0.65	0.83	-0.35	
DOC	0.05	-0.01	-0.14	0.29	0.91**	-0.85	0.95*	1.00**	0.56	
TP	0.55*	0.19	0.63*	-0.43	0.07	-0.95*	-0.56	0.77	0.78	
DTP	0.55*	0.97*	0.51	1.00**	0.83*	-0.86	0.95*	0.76	0.94	
PO ₄ -P	0.79**	0.98*	0.79**	0.97	0.76*	-0.17	0.79	0.79	0.97*	
DTN	0.20	-0.40	0.22	-0.36	0.18	-0.38	0.68	0.67	-0.19	
NO ₃ -N	0.72**	0.52	0.68*	0.66	0.65	0.62	0.80	0.85	0.42	
NH ₄ -N	-0.67**	-0.46	0.75**	-0.54	-0.56	0.05	0.30	-0.98*	0.80	

*significant at the 0.05 level (2-tailed)

**significant at the 0.01 level (2-tailed)

목간 회귀분석을 실시한 결과 충주호 SOD는 심층수 수온($r=0.78, p<0.01$)과 높은 상관관계를 나타냈으며, 특히 7월과 9월에는 심층수 수온($r=0.88, p<0.01$)과 상관이 높게 나타나 성층이 형성되는 시기인 7월과 9월 충주호의 SOD는 심층수 수온의 영향을 크게 받은 것으로 보인다(Table 6). Seiki *et al.* (1994)은 SOD에 대하여 온도의 영향이 가장 크며 10°C 이하 온도에서는 SOD가 거의 일정하다고 하였다. 본 연구 결과에서도 전 지점에서 온도의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 약 70 m로 수심이 깊은 CJ-St. 1의 경우 다른 지점에 비해 낮은 SOD 값을 나타낸 것은 낮은 수온의 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3, Table 6).

Moore *et al.* (1996)은 퇴적층의 산소소모는 산소 농도 보다는 유기물, 즉 기질에 의해 영향을 받는다고 보고하였다. 퇴적물에 포함된 유기물은 미생물에 의해 산소를 소모하면서 분해되며, 이는 퇴적물의 정향에 의해 좌우되는 것으로 보고되고 있다(Bostrom *et al.*, 1982; Chau, 2002; 정 등, 2003). 강과 송(2000)은 팔당호의 SOD는 퇴적유기물의 양과 퇴적층 내로의 산소 확산의 영향이 크다고 하였으며, 초기 30분 동안에 물과 퇴적층의 산소 요구를 비교하면 SOD가 수층 전체 산소소모의 63.8~

94.0% 범위를 차지한다고 하였다. 이번 조사에서도 팔당호의 SOD와 유기물 함량이 유사한 변화 양상을 나타내 유기물의 증가가 SOD의 변화에 영향을 미치는 것으로 보인다(Table 2). 충주호 퇴적물의 유기물 함량은 6.2~11.3% 범위로 팔당호 퇴적물의 유기물 함량인 7.4~10.7% 범위보다 약간 적거나 비슷하였으며 수온차이가 크지 않았던 CJ-St. 1에서는 강우기 이후인 7, 9 및 11월에 유기물 함량($r=1.00, p<0.05$)과 높은 양의 상관을 나타내어 퇴적물의 유기물 함량이 SOD에 영향을 준 것으로 나타났다. 그러나 전 조사시기동안 전 지점의 SOD와 유기물 함량과의 상관분석결과 $r=-0.61 (p<0.05)$ 로 SOD와 음의 상관을 나타내 유기물함량에 비해 수온 등의 다른 환경인자의 영향이 큰 것으로 나타났다(Table 6).

정과 조(2003)는 퇴적물 입자조성이 산화환원전위, 함수량, 유기물함량, 간극수 등에 영향을 주며, 이러한 퇴적물의 성상은 SOD의 값을 크게 좌우할 수 있다고 하였으며, 사질 함량이 높은 지점에서 니질인 지점보다 SOD가 낮아 입도조성이 퇴적물의 산소 소모율에 영향을 미친다고 보고하였다. 이번 연구에서 팔당호와 충주호에서 퇴적물내 clay와 silt의 함량은 각각 78.7~84.4%, 56.9~100% 범위를 나타냈는데, 충주호에서 9월 CJ-St. 1을 제외하면

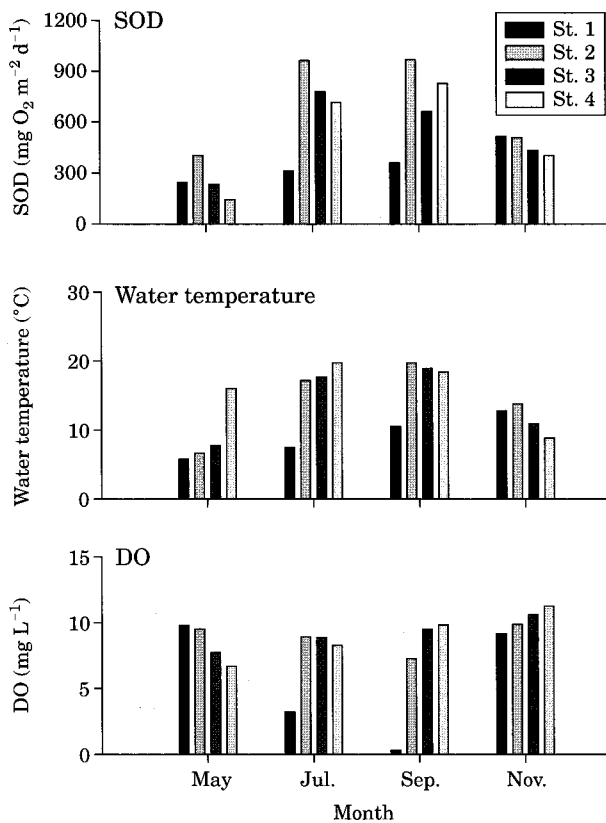


Fig. 3. SOD, water temperature and DO of hypolimnetic water in Lake Chungju from May to November, 2005.

충주호 퇴적물 내 clay와 silt의 함량이 팔당호 퇴적물보다 약간 높았다(Table 2, 3). 팔당호의 경우 퇴적물의 clay와 silt의 함량이 PD-St. 1과 PD-St. 2에서 모두 SOD와 반대되는 경향을 나타내, 퇴적물의 입자 중 clay와 silt의 조성이 SOD의 증가에 영향을 미친다는 Chau (2002)의 연구 결과와는 일치하지 않았다. 이것은 체류시간이 짧은 하천형 호소인 팔당호의 경우, 충주호에 비해 퇴적물의 교란이 심하기 때문에 안정화된 퇴적물의 형성이 어렵기 때문인 것으로 추정된다.

팔당호는 조사 지점과 횡수가 적어 회귀분석을 통한 상관관계를 조사하지 못하였으나, 팔당호에서 수온이 유사하였던 6월과 9월에는 퇴적물의 유기물 함량과 SOD의 증감이 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아 팔당호의 경우 퇴적물의 유기물 함량이 SOD의 변화에 영향을 미친 것으로 추정된다(Table 2). 11월의 경우 유기물 함량이 높았어도 수온이 6월과 9월에 비해 현저히 낮았기 때문에 SOD가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 특히 PD-St. 1(팔당댐 앞)에 비해 수심도 낮고 과영양상태의 PD-

St. 2의 경우 수층의 BOD₅ 값 및 클로로필 *a* 농도가 퇴적물의 유기물 함량과 마찬가지로 6월과 9월에는 SOD와 유사한 증감을 나타냈으며 11월의 경우 다른 양상을 보여, 경안천 수역에서는 수층 유기물농도가 퇴적물의 유기물 함량에 바로 영향을 미치며 이는 다시 SOD로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한편 PD-St. 1의 경우 6월이 9월에 비해 BOD₅ 값이 높았음에도 불구하고 SOD는 더 낮았다. 이런 현상은 6월과 9월의 수층 BOD₅ 즉 유기물의 기원의 차이에서 기인하는 것으로 추정된다. 즉 6월의 경우 장마로 인한 유입량 증가로 수층 유기물의 기원은 외부 유역에서 유래된 유기물이며 반면에 9월의 경우 가을철 갈수현상으로 팔당호의 체류시간이 증가되면서 수층에서 식물플랑크톤 증식이 활발히 일어나고 이로 인한 내부생산유기물이 수층유기물의 기원으로 판단된다. 클로로필 *a*의 증가는 식물플랑크톤 현존량의 증가를 의미하는데, 식물플랑크톤 현존량이 증가하게 되면 광합성량의 증가로 수층 산소농도가 높아지고, 생성된 유기물이 저층으로 침강하면서 퇴적물의 산소소모가 증가하게 된다(Ryding and Rast, 1989; 홍 등, 2000). 즉 식물플랑크톤 사체들이 유기물 입자로서 침강하기 때문에 SOD의 증가에 영향을 미치는 것으로 추정된다. 유기물 입자로서 퇴적물에 침강되는 식물플랑크톤 등은 외부 유역에서 유입되는 토양 및 식물의 잔재 등에 비해 생분해되기 쉬운 연질 유기물로서 퇴적물에서 영양염을 용출시키는 원인이 되며 식물플랑크톤 대발생기 이후에 NH₄⁺ 용출량이 급격히 증가하는 것이 그 예이다(Jensen *et al.*, 1990). 퇴적물에서 식물플랑크톤의 함량이 많을수록 N, P 및 Si의 용출량이 점진적으로 증가하는 것(Cowen and Boynton, 1996; Cowen *et al.*, 1996)으로 알려져 있다. 따라서 PD-St. 1에서 9월에 수층의 클로로필 *a* 농도가 현저히 증가하여 퇴적층의 SOD 증가에 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

그밖에 충주호에서는 심층수의 PO₄-P ($r=0.79, p<0.01$), TP ($r=0.55, p<0.05$), DTP ($r=0.55, p<0.05$), NO₃-N ($r=0.72, p<0.01$) 등이 SOD와 높은 양의 상관관계를 나타냈고, NH₄-N ($r=-0.67, p<0.01$)와는 음의 상관관계를 보였다. 정과 조 (2003)는 퇴적물의 산소 소모량이 많을수록 PO₄³⁻와 NH₄⁺ 용출량이 증가하나, NO₃⁻는 NH₄⁺ 용출량과 역 상관관계를 가져 감소하는 경향을 나타낸다고 하였으며, 이것은 온도가 상승할수록 질화세균 등의 활성이 증가하고 수층의 NO₃⁻ 농도를 감소시키는 요인으로 작용하기 때문이라고 하였다. 그러나 본 연구에서는 이와 반대로 심층수의 NO₃⁻가 SOD와 양의 상관관계를, NH₄⁺는 음의 상관관계를 나타냈는데, 본 실험에서 질화작용 저해제를

사용하여 질화작용에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 결과를 종합해 보면 팔당호와 충주호에서는 심층수의 온도, 유기물 함량 등이 SOD의 변화에 영향을 미치는 것으로 추정된다. 기존 연구에서도 온도, DO농도, 유기물(유기물 층의 두께, 유기물 함량) 및 퇴적물 내 환원성 물질 등이 퇴적물의 산소소모량에 영향을 미치는 요인이 되며, 이러한 것들은 산소소모량 뿐만 아니라 무기 영양염의 용출에도 직간접적으로 영향을 미친다고 알려져 있다(정과 조, 2003).

수심이 얇고 체류시간이 짧아 여름철 성층이 형성되지 않고 충주호에 비해 퇴적물의 교란이 심한 팔당호의 SOD는 퇴적물의 유기물 함량과 퇴적물 유기물의 기원에 영향을 많이 받는 것으로 추정된다. 기존 연구 결과에서도 팔당호 퇴적물의 산소소모량(SOD)은 상부 수층에서 생성된 유기물의 종류에 따라 저층에 쌓이는 양이 다르며, 궁극적으로 퇴적물의 산소소모량에 영향을 준다는 것을 확인한 바 있다(홍 등, 2000).

수심이 깊고 체류시간이 긴 충주호의 SOD는 수심에 따른 온도-DO의 변화, 심층수의 유기탄소(TOC, DOC)와 영양염류의 농도(PO₄-P, TP, DTP, NO₃-N) 등 물리·화학적 인자와 SOD가 관련이 있는 것으로 나타났다.

팔당호와 충주호의 SOD 값은 모두 1,500 mg O₂ m⁻² d⁻¹ 이하로 퇴적물의 유기물 오염정도는 심하지 않은 것으로 나타났으나, 두 호수 모두 퇴적물에서 유기물 분해에 의한 산소소모가 이루어지고 있고, 또한 충주호는 계절에 따라 성층을 형성하여 심층수가 빈산소 상태가 되는 것으로 보고되고 있어(한강물환경연구소, 2005), 이런 퇴적물에서의 유기물 분해에 의한 산소소모가 수층의 용존산소 농도에 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 장기적인 수질 관리를 위해서는 각 호수에서 유형별로 나타나는 수체와 퇴적물의 물리학적 특성과 생물화학적 특성, 그리고 이것이 호수 환경에 미치는 영향을 고려하여 그에 맞는 수질관리 대책이 마련되어야 할 것이다.

적 요

본 연구에서는 한강수계의 대표적 대형 호수인 팔당호와 충주호에서 시기별로 퇴적물의 산소요구량(SOD)을 조사하고, 수리학적 유형이 다른 두 호수에서 SOD에 영향을 주는 인자를 유추하여 두 호수에서의 수질예측 등을 위한 모델에 사용할 계수를 제시하고자 하였다. 2005년 6, 9 및 11월 팔당호 내 2지점인 댐 앞과 광동교에서,

2005년 5, 7, 9 및 11월에는 충주호 내 4개 지점에서 SOD를 측정된 결과, 팔당호 두 지점의 SOD는 337.8~881.0 mg O₂ m⁻² d⁻¹, 충주호 네 지점에서는 143.0~969.1 mg O₂ m⁻² d⁻¹의 범위로 나타나 두 호수에서 퇴적물의 유기물오염은 심하지 않은 상태로 조사되었다. 호수별로 조사 지점과 조사 시기에 따라 SOD의 차이를 보였으나 두 호수간의 차이는 크지 않았다. 두 호수에서 SOD에 영향을 미치는 환경인자를 조사한 결과, 팔당호의 SOD는 퇴적물의 유기물 함량과 유사한 변동패턴을 보여 SOD 변화에 영향을 미치고 있음을 시사하였다. 충주호의 SOD는 심층수 수온($r=0.78, p<0.01$), PO₄-P($r=0.79, p<0.01$), TP($r=0.55, p<0.05$), DTP($r=0.55, p<0.05$), NO₃-N($r=0.72, p<0.01$) 등과 높은 양의 상관관을 나타냈다. 따라서 수심이 얇고 체류시간이 짧은 팔당호의 SOD는 퇴적물의 유기물함량과 기원의 영향을 많이 받으며, 수심이 깊고 체류시간이 긴 충주호의 SOD는 물리·화학적 인자에 의해 영향을 받는 것으로 추정된다

사 사

본 연구는 2005년 한강수계 환경기초조사사업 「수중생태계 물질순환 및 에너지흐름조사」의 일부로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

강양미, 송홍규. 2000. 팔당호 수변부 퇴적물이 수층의 산소소모에 미치는 영향, 육수지 33(1): 23-30.
 공동수, 윤일병, 류재근. 1996. 팔당호의 물수지 및 수문특성, 육수지 29: 51-64.
 국립수산진흥원. 1997. 해양환경공정시험법.
 국립환경연구원. 2003. 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자조사 최종보고서.
 박혜경, 이유희, 정동일. 2004. 강우기 및 평수기의 팔당호 유기물 수지산정, 육수지 37(3): 272-281.
 박혜경, 이현주, 김은경, 정동일. 2005. 팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석, 한국물환경학회지 21(6): 584-594.
 전상호. 1990. 한강 퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 이동성에 관한 연구, 육수지 23(1): 31-42.
 정연규, 배범한, 김용학, 엄재민. 2003. 토양 분리 인용출 미생물을 이용한 준설퇴적토 내 인의 제거, 대한환경공학회지 25: 221-226.
 정하영, 조경제. 2003. 낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출, 육수지 36(3): 322-335.

- 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회. 2005. 한강수계 환경 기초조사사업 '수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름 조사' 2년차 보고서.
- 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회. 2006. 한강수계 환경 기초조사사업 '수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름 조사' 3년차 보고서.
- 홍선희, 석정현, 김동주, 박경미, 전선옥, 안태석. 2000. 팔당호 수체에서 산소의 생성과 소모, *육수지* **33**(4): 374-379.
- 환경부. 2002. 수질오염공정시험방법.
- Belanger, T.V. 1981. Benthic oxygen demand in Lake Apopka, Florida. *Water Research* **15**: 267-274.
- Blosser, R.O. 1986. Recent studies on the comparision of in-situ and laboratory Sediment Oxygen Demand measurement techniques. *NCASI Technical Bulletin* **489**: 1-9.
- Bostrom, B., M. Jansson and C. Forsberg. 1982. Phosphorous release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limn.* **37**(3): 31-39.
- Burns, N.M. 1995. Using hypolimnetic dissolved oxygen depletion rates for monitoring lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **29**: 1-11.
- Chau, K.W. 2002. Field measurements of SOD and sediment nutrient fluxes in a land-locked embayment in Hong Kong. *Advances in Environmental Research* **6**: 135-142.
- Cowen, J.L. and R.B. Boynton. 1996. Sediment-water oxygen and nutrient exchanges along the longitudinal axis of Chesapeake Bay: seasonal patterns, controlling factors and ecological significance. *Estuaries* **19**: 562-580.
- Cowen, J.L.W., J.R. Pennock and W.R. Boynton. 1996. Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxes in Mobile Bay, Alabama (USA): regulating factors and ecological significance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **141**: 229-245.
- Eaton, A.N., L.S. Clesceri, E.W. Rice and A.E. Greenberg. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. APHA AWWA WEF, Washington.
- Epping, E.H.G. and W. Helder. 1997. Oxygen budgets calculated from in situ oxygen microprofiles for Northern Adriatic sediments. *Cont. Shelf Res.* **17**(14): 1737-1764.
- Gelda, R.K., M.T. Auer and S.W. Effler. 1995. Determination of sediment oxygen demand by direct measurement and by inference from reduced species accumulation. *Mar. Freshwater Res.* **46**: 81-88.
- Jensen, M.M., E. Lomstein and J. Sorensen. 1990. Benthic NH_4^+ and NO_3^- flux following sedimentation of a spring phytoplankton bloom in Aarhus Bight, Denmark. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **61**: 87-96.
- Moore, B.C., P.H. Chen, W.H. Funk and D. Yonge. 1996. A model for predicting lake sediment oxygen demand following hypolimnetic aeration. *Water Resources Bulletin* **32**: 723-731.
- Otubu, J.E. 1989. Temperature and nutrient effect on tubificid worms and their relation to Sediment Oxygen Demand. Ph. D. Thesis. Department of Environmental Science, Rutgers University.
- Ryding, S.O. and W. Rast. 1989. The control of eutrophication of lakes and reservoirs. UNESCO. Paris.
- Seiki, T., E.D. Izawa and H. Sunahara. 1994. Sediment oxygen demand in Hiroshima Bay. *Wat. Res.* **28**: 385-393.
- Sommaruga, R. 1991. Sediment oxygen demand in man-made lake Ton-Ton (Uruguay). *Hydrobiologia* **215**: 215-221.
- Takada, K. and K. Kato. 1991. Benthic oxygen consumption in Lake Suwa. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **24**: 1091-1094.
- Truax, D.D., A. Shindala and H. Sartain. 1995. Comparison of two sediment oxygen demand measurement techniques. *J. Environ. Eng.* **121**: 619-624.

(Manuscript received 30 January 2007,
Revision accepted 11 September 2007)